

Ultra-fluid, oriented hybrid-fibre-concrete

Doctoral Thesis**Author(s):**

Stähli, Patrick

Publication date:

2008

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005722547>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 17996

Ultra-Fluid, Oriented Hybrid-Fibre-Concrete

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences ETH Zurich

presented by

PATRICK STÄHLI

Dipl.-Bauing, ETH Zurich

born 22.01.1975

citizen of

Oberhofen am Thunersee, Bern

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jan G.M. van Mier, examiner

Prof. Dr. Marco Di Prisco, co-examiner

Prof. Dr. Viktor Mechtcherine, co-examiner

2008

Summary

Ultra fluid oriented hybrid fibre concrete

In the research project presented in this PhD-Thesis, an ultra fluid hybrid fibre concrete (HFC) with three types of steel fibres was developed, with improved tensile strength and flow properties. Due to the ultra fluidity of the material the fibres aligned in the flow directions of the material and both, tensile strength and ductility could be increased. The fibres used were straight (small and middle fibres), notched or undulated (large fibres). All fibres are made of high strength steel ($f_y=1100-2400$ MPa).

In this project many important aspects were considered. In more than 100 mixtures, which differed in the total amount and/or the amount of the single type of fibres, fresh concrete properties, alignment of the fibres and mechanical properties were determined. New testing methods to determine the orientation of the fibres, degree of self-leveling, bending and tensile strength were developed. Furthermore crack patterns for mixtures with different fibres and combinations of the fibres, loaded under different conditions were analyzed.

Bending test were performed using the newly developed pendulum-bar four-point bending test set-up. The rationale for using pendulum bars is based on the idea that during a four-point bending test the forces which act on the specimen should remain perpendicular to the specimen, the symmetry should be maintained throughout the whole test, there should be no friction between the supports and the specimen, and it should be possible to measure the forces at supports and load-points. Basically the same idea was used in order to develop a tensile test appropriate for the determination of the mechanical properties of HFC. The pendulum-bar tensile test set-up was developed and built. The reason for using pendulum-bars is based on the idea that during a tensile test the forces should remain centric and the supports should be able to rotate. This becomes important especially when a

material of increased ductility, such as HFC, is used. Van Mier et al. [1994b] showed that the boundary conditions in a uniaxial tensile test have a significant influence on the result of the test. The tensile strength and also the fracture energy obtained from uniaxial tensile tests between fixed boundaries are higher than the values received from tests with rotation supports.

The so called SegBox was developed in order to determine the segregation of the fibres and the degree of self-leveling of the fresh concrete. Later on the same test was used to determine the orientation of the fibres. Several filling methods and mould geometries were developed. The fibre orientation was determined and a flow-orientation model was elaborated. The orientation of the fibres was determined using cross-sections of hardened specimens or CT-scans from a medical CT-scanner. The fibres were counted manually and the orientation of the fibres could be determined. The advantage of the CT-scanner is apparent: the scanning is a non-destructive method and the mechanical properties can be determined after scanning a specimen. Relations between fibre orientation and mechanical properties were determined and are presented in this thesis.

Crack patterns were analyzed on specimens under load. The specimens were loaded in four-point bending. The deformations of the specimen were maintained by gluing two steel plates on the sides of the specimen while it was under load. Afterwards the specimens were impregnated using a fluorescent epoxy resin, cut and photographed under UV-light. The crack patterns were traced on the computer and analyzed using a self-developed MATLAB script. The results showed some interesting findings namely that the crack spacing is not dependent on the fibre type. A similar average crack spacing was observed for the non-elastic part of the load-displacement diagram for all types of fibres.

Finally in the last Chapter of this PhD-Thesis some samples of applications of the newly developed material are introduced. Most of these applications are architectural projects. Ultra-fluid fibre reinforced concrete was used in order to fill moulds with complicated geometrical details or to resist external forces such as demoulding forces or simple external loads.

Patrick Stähli
8th October 2008

Zusammenfassung

Ultra fluid oriented hybrid fibre concrete

In der vorliegenden Doktorarbeit ist das Forschungsprojekt zusammengefasst, welches sich mit der Entwicklung von hybriden Faserbetonen (HFC) mit drei verschiedenen Fasertypen und verbesserter Zugfestigkeit und Fliessfähigkeit befasste. Durch die hohe Fliessfähigkeit richten sich die Fasern in der Fliessrichtung aus, wodurch sich die Zugfestigkeit und Verformbarkeit deutlich steigern lässt. Gerade (kleine und mittlere), gekerbte und gewellte (lange) Stahlfasern aus hochfestem Stahl ($f_y=1100-2400$ MPa) wurden für die Betonmischungen verwendet.

Dieses Projekt deckt viele wichtige Aspekte der Faserbetonforschung ab. In mehr als 100 Mischungen, welche sich in Fasertypen und deren Kombination und/oder Fasermengen unterscheiden, wurden die Frischbetoneigenschaften, die Faserausrichtung und die mechanischen Eigenschaften bestimmt und untersucht. Neue Testmethoden zur Bestimmung der Ausrichtung der Fasern, des Selbstnivellieren des Frischbetons und das Bestimmen der Biegezug- und Zugfestigkeiten wurden entwickelt. Rissbilder von Betonmischungen mit verschiedenen Fasern und deren Kombinationen wurden an Probekörpern analysiert, welche unterschiedlich belastet wurden.

Mit der neuentwickelten Pendulum-Bar Vierpunkt Biegezugeinrichtungen wurden Biegezugprüfungen durchgeführt. Der Grund, weshalb Pendulum-Bars (Pendelstäbe) zum Einsatz kamen ist, dass die Kräfte während der ganzen Versuches senkrecht auf den Prüfkörper wirken, die Symmetrie während des ganzen Versuches erhalten bleibt, die Reibung zwischen Prüfkörper und Prüfeinrichtung minimiert wird und die Kräfte in den Krafteinleitungspunkten und den Auflagern gemessen werden konnten. Die gleiche Ideen (Pendelstäbe) wurde verwendet um einen Zugversuch zu entwickeln, welcher geeignet ist, die mechanischen Eigenschaften von HFC zu bestimmen. Die Pendulum-Bar Zugversuchseinrichtung wurde entwickelt und gebaut. Pendelstäbe ka-

men hier zum Einsatz, dass die Kräfte während des ganzen Versuches zentrisch bleiben und sich die Lager frei drehen konnten. Diese Eigenschaften sind besonders wichtig, wenn Materialien mit erhöhter Duktilität (HFC) geprüft wird. Van Mier et al. [1994b] zeigten, dass die Randbedingungen in einem Direktzugversuch die Resultate beträchtlich beeinflussen. Die Werte der Zugfestigkeit, sowie diejenigen der Bruchenergie sind höher bei Versuchen mit fixierten Lagern als diejenigen bei Versuchen mit frei rotierenden Lagern.

Die sogenannte SegBox wurde entwickelt um die Segregation von Fasern und das Selbstnivellieren des Frischbetons zu bestimmen. Derselbe Versuch wurde später verwendet um die Faserausrichtung im Innern von Betonproben zu bestimmen. Verschiedenste Füllmethoden und Schalungsgeometrien wurden entwickelt um die Faserausrichtung zu kontrollieren. Anhand dieser Ergebnisse wurde ein Fluss-Orientierungs Modell erarbeitet. Um die Faserausrichtung zu bestimmen kann man Probekörper aufschneiden oder mittels Computertomographie virtuelle Schnitte durch die Probekörper legen und mittels Handzählung der Fasern die Faserverteilung bestimmt. Die Vorteile eines CT's liegen auf der Hand: Das scannen ist eine zerstörungsfreie Methode und die mechanischen Eigenschaften der gescannten Probekörper können zusätzlich bestimmt werden. Verschiedene Schnitte können an demselben Probekörper untersucht werden. Zusammenhänge zwischen Faserausrichtung und Festigkeit werden in dieser Doktorarbeit präsentiert.

Weiter wurden Untersuchungen an Rissbilder von Probekörpern unter Last durchgeführt. Die Proben wurden in Vierpunkt Biegung belastet. Die Verformungen/Durchbiegung fror man mittels ankleben von Stahlplatten an die Seiten des Probekörpers ein. Danach imprägnierte man die Probekörper mit fluoreszierendem Epoxydharz, schnitt sie und fotografierte sie unter UV Licht. Am Computer konnte das Rissbild nachgezeichnet und mittels MATLAB analysiert werden. Die Resultate zeigten einige interessante Gesichtspunkte:

- die Rissabstände sind nicht vom Fasertyp abhängig
- es stellt sich ein ähnlicher durchschnittlicher Rissabstand für den nicht elastischen Bereich des Last-Verformungs-Diagramms für alle Fasertypen ein.

Schlussendlich werden im letzten Kapitel dieser Doktorarbeit Anwendungen vorgestellt, welche mit diesem neu entwickelten Material realisiert wurden, meistens Projekte von Architekturstudenten. Um die komplizierten Geometrien derer Modelle und Strukturen füllen zu können und den hohe Anforderung an Festigkeit während des Ausschalprozesses gerecht zu werden

wurde extrem flüssiger faserverstärkter Beton mit erhöhter Festigkeit und Duktilität verwendet.

Patrick Stähli
8^{ter} Oktober 2008